

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 621.317

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ
РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ
МЕТОДОМ СИМУЛЯЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ***

В.А. ЖМУДЬ¹, В.М. СЕМИБАЛАМУТ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: oao_nips@bk.ru

² 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13/3, Геофизическая служба СО РАН, кандидат физико-математических наук. E-mail: wladim28@yandex.ru

Проектирование многоканальных регуляторов аналитическими методами затруднительно. Это связано с тем, что в случае если объект описывается сложной математической моделью, аналитические методы требуют сложных вычислений, которые невозможно задать соотношениями в общем виде. Поэтому чем сложнее модель объекта, тем сложнее использование аналитических методов. В многосвязных (или многоканальных) объектах эта проблема стоит наиболее остро, так как в таких объектах сигнал на каждом входе влияет на каждую выходную величину. Связи между входами и выходами описываются передаточными функциями. Если эти передаточные функции просты, например, фильтры первого порядка, то аналитические методы могут быть применены. Если же в таких передаточных функциях присутствуют звенья запаздывания либо для адекватного описания таких связей приходится также использовать нелинейные звенья, то аналитический расчет регулятора практически невозможен. Методы численной оптимизации при моделировании позволяют упростить решение этой задачи. Однако при этом могут получаться системы с большим перерегулированием. В статье предлагается использование разработанной методики, которая апробирована моделированием. Зачастую в матрице регулятора требуется содержание не только ненулевых элементов в ее главной диагонали, но также наличие ненулевых элементов в других позициях этой матрицы. Однако, если диагональная матрица позволяет получить достаточно эффективное управление, введение других элементов может не потребоваться. Одним из приемов, позволяющих повысить эффективность расчета регулятора, является правильный выбор нумерации входов и выходов каналов. Это предполагает выбор соответствия между входами и выходами таким образом, чтобы в главной диагонали по возможности

* Статья получена 5 июня 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138. Тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоёмких результатов интеллектуальной деятельности».

стояли элементы с большими коэффициентами в сравнении с другими элементами и (или) элементы с большим быстродействием (то есть с меньшими значениями постоянных времени в знаменателе). Поэтому в примерах рассматриваются объекты, отвечающие этому требованию, если же оно не удовлетворено, следует изменить нумерацию выходов или входов.

Ключевые слова: автоматика, регулятор, многоканальные системы, оптимизация, моделирование, энергосбережение, теория автоматического управления, численная оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

Управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью применяется в науке, технике, в бытовых приборах и высокоточных технологиях, поскольку это единственный метод точного управления в условиях возмущений, которые невозможно измерить или предсказать [1–13]. Такие системы успешно работают лишь при правильном расчете регуляторов. Для расчета регуляторов могут быть применены аналитические методы или методы, основанные на моделировании и оптимизации [14–20].

Для линейных объектов с одним входом и одним выходом аналитические методы разработаны достаточно хорошо. Они менее эффективны для объектов с несколькими входами и выходами, особенно при высоком порядке объекта и при наличии нелинейностей, запаздывания и иных особенностей, затрудняющих аналитический расчет.

В этих случаях более успешно регулятор рассчитывается путем оптимизации [21–22].

Нами предложены методы оптимизации многоканальных объектов, состоящие в рекомендациях по тестовым сигналам, целевым функциям и иным особенностям использования процедуры оптимизации [2–7].

Также нами ранее предложены и исследованы методы для расчета регуляторов, обеспечивающих сбережение энергии управления [8]. Такие регуляторы предложены и апробированы для одноканальных систем. Под энергией управления предложено понимать интеграл от квадрата управляющего сигнала, что имеет глубокий физический смысл, например, при управлении космическим кораблем. При исследовании выяснено, что введение в стоимостную функцию энергетических затрат не только способствует их снижению, но также уменьшает перерегулирование в системе, способствует уменьшению колебаний в переходном процессе.

В настоящей статье исследуется возможность совмещения предложенных принципов с целью проектирования энергосберегающих регуляторов для многоканальных объектов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее просто исследовать предлагаемые оптимизации с использованием программы VisSim на примере объектов размерностью 2×2 (т. е. объектов с двумя входами и двумя выходами). Распространение этой методики для объектов более высокой размерности требует лишь увеличения вычислительных ресурсов, а также перехода на новейшие версии этой программы. В учебных и исследовательских целях достаточно использование любой версии, включая демо-версию, распространяемую производителем бесплатно.

Основная проблема многоканальных систем состоит в перекрестных связях. В таких объектах сигнал на каждом входе влияет на каждую выходную величину, такое влияние описывается соответствующей передаточной функцией $w_{ij}(s)$, т. е. передаточной функцией по Лапласу от i -го входа на j -й выход.

Наиболее распространенные передаточные функции имеют вид рациональной дроби с полиномами в числителе и знаменателе. Здесь s – аргумент преобразования Лапласа, который в некоторых случаях можно упрощенно трактовать как символ операции дифференцирования, в том смысле что умножение на s означает взятие производной, а деление на s означает интегрирование сигнала и т. д.

Пусть объект описывается матричной передаточной функцией вида

$$W(s) = [w_{ij}(s)]. \quad (1)$$

Это означает, что при подаче на вход объекта управления в виде набора сигналов

$$U(s) = [u_k(s)] \quad (2)$$

вектор выходных сигналов определяется из следующего соотношения:

$$Y(s) = [y_k(s)] = W(s)U(s). \quad (3)$$

Здесь

$$y_k(s) = \sum_{i=1}^n w_{ij}(s)u_i(s). \quad (4)$$

Требуется найти регулятор, обеспечивающий автономное астатическое управление, т. е. равенство вектора установившегося выходного значения век-

тору предписанных значений $V(s)$. Традиционное для этой задачи уравнение регулятора имеет вид

$$U(s) = W_R(s)[V(s) - Y(s)], \quad (5)$$

где $W_R(s)$ – матричная передаточная функция регулятора, которую следует определить. Для ПИД-регулятора она имеет вид

$$W_R(s) = \left[K_{(P)ij} + \frac{K_{(I)ij}}{s} + sK_{(D)ij} \right]. \quad (6)$$

Требуемый результат управления во временной области обычно пишут так:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y(t) = V. \quad (7)$$

Особенность требования экономии энергии состоит в требовании достижения минимума следующего интеграла:

$$\Theta(T) = \int_0^T \sum_{i=1}^n u_i^2(t) dt. \quad (8)$$

Здесь T – время переходного процесса, по окончании которого можно считать требование (7) выполненным с достаточной точностью.

Наиболее остро задачи энергосбережения стоят в случаях, когда в модели объекта имеется интегратор, поскольку в таких задачах после выполнения задачи управления на поддержание выходной величины, равной предписанному значению, ресурс управления не тратится. Действительно, если это не так, то экономия управляющего ресурса во время переходного процесса не имеет большого смысла, если даже для поддержания выходного значения на требуемом уровне требуется постоянная затрата энергии.

Другой особенностью задач энергосбережения являются пониженные требования к виду переходного процесса в его начале. Действительно, например, если требуется перевести спутник с одной стационарной орбиты на другую и затраты энергии имеют место лишь при этом движении с одной орбиты на другую, то важно, чтобы переход на требуемую орбиту был осуществлен наиболее точно, а вид самой траектории уже не столь существен.

2. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Качество переходного процесса удобно оценивать положительной стоимостной функцией. При этом чем меньше значение этой функции, тем регулятор лучше. Минимум стоимостной функции должен обязательно означать выполнение условия (7). Например, это может быть интеграл от суммы модулей ошибки управления:

$$F_1(T) = \int_0^T \sum_{i=1}^n |e_i(t)| dt. \quad (9)$$

Здесь $e_i(t) = v_i(t) - y_i(t)$ – ошибка управления по i -му входу.

Если в эту функцию ввести затраты энергии (8) с некоторым весовым коэффициентом α , то в результате процедуры оптимизации будет осуществляться поиск таких параметров регулятора, которые обеспечивают минимум составной стоимостной функции вида

$$F_2(T) = F_1(T) + \alpha \Theta(T). \quad (10)$$

Мы предлагаем нижеследующие дополнительные модификации стоимостной функции.

Во-первых, при оптимизации многоканальной системы требуется независимость отдельных каналов. Это означает, что изменения на первом входе должны порождать изменения только на первом выходе и не порождать изменений на остальных и т. д. Поэтому тестовые сигналы на всех входах должны отличаться друг от друга. Например, предлагается для случая двухканальной системы на первый вход подавать ступенчатый скачок с нулевой задержкой, а на второй канал – ступенчатый скачок с задержкой, равной половине времени интегрирования: $\Delta T_1 = 0$, $\Delta T_2 = T/2$.

Во-вторых, можно считать, что ошибка в самом начале переходного процесса не слишком существенна для результата управления, поэтому интегрирование в соотношении (8) можно начать не с нулевого времени, а с некоторого наперед заданного значения, например $T/6$. Поскольку задание $v_2(t)$ изменяется с запаздыванием на величину ΔT_2 , то также можно исключить из интегрирования период от ΔT_2 до $\Delta T_2 + T/6$.

В-третьих, целесообразно исследовать эффективность введения в целевую функцию значения модуля от производной от ошибки управления. Действи-

тельно, например, для случая выведения спутника на новую орбиту недостаточно, чтобы его положение в конце управления соответствовало требуемому положению; необходимо также, чтобы и скорость спутника соответствовала требуемому значению. Поэтому необходимо не только нулевое значение ошибки управления, но и нулевое значение производной по времени от этой ошибки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РЕГУЛЯТОРА

Пример 1

Зададим объект управления следующей передаточной функцией:

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} 5 \frac{\exp(-s)}{(2s+1)s} & \frac{\exp(-2s)}{(s+1)s} \\ \frac{\exp(-1,6s)}{(2s+1)s} & 2 \frac{\exp(-1,2s)}{(s+1)s} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Поскольку объект содержит интегратор (присутствует множитель s в каждом знаменателе), то интегратор в регуляторе не требуется. Поэтому будем искать регулятор в следующем виде:

$$W_R(s) = [K_{(P)ij} + sK_{(D)ij}] = \begin{bmatrix} K_{P11} + sK_{D11} & K_{P12} + sK_{D12} \\ K_{P21} + sK_{D21} & K_{P22} + sK_{D22} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Первый шаг целесообразно попытаться осуществить с помощью простого диагонального регулятора, т. е. положить в (12) все элементы, кроме элементов главной диагонали, равными нулю:

$$W_{RDIAG}(s) = \begin{bmatrix} K_{P11} + sK_{D11} & 0 \\ 0 & K_{P22} + sK_{D22} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Если с регулятором вида (13) успех не будет достигнут, потребуется применение структуры (12).

На рис. 1 показана структура объекта в программе VisSim для моделирования, на рис. 2 – структура регулятора для этих же целей.

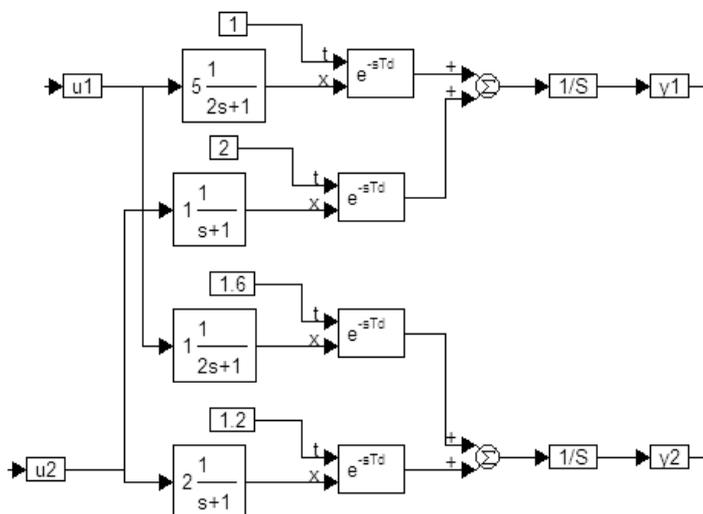


Рис. 1. Структурная схема объекта

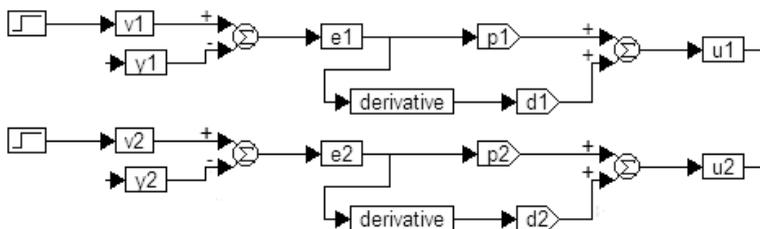


Рис. 2. Структурная схема регулятора

На рис. 3 показана структура всей схемы моделирования, где объект и регулятор включены в составные блоки, а собственно в структуре содержатся вычислители стоимостной функции в соответствии с уравнением (10) и осциллографы для отображения переходных процессов. Также в схему введены индикаторы окончательных значений коэффициентов регулятора и индикаторы затрат энергии отдельно по первому и по второму каналам.

Как видим из графиков на рис. 3, перегулирование в системе составляет около 20 % по каждому каналу при скачке на другом канале, перегулирование при скачке на своем канале отсутствует, длительность переходного процесса в каждом канале составляет от 10 до 15 с.

Уравнение полученного регулятора имеет вид

$$W_{R1}(s) = \begin{bmatrix} 0,1246 + 0,2368s & 0 \\ 0 & 0,129 + 0,0024s \end{bmatrix}. \quad (14)$$

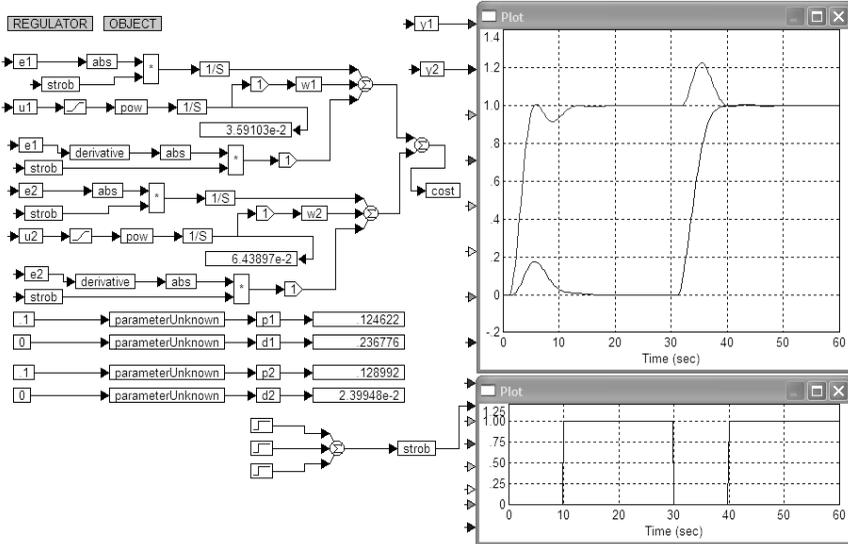


Рис. 3. Структурная схема системы моделирования для оптимизации и результат оптимизации

Энергетические затраты по каналам управления равны, соответственно, $\theta_1 = 0,0359$; $\theta_2 = 0,044$.

Пример 2

Усложним объект управления и зададим его следующей передаточной функцией:

$$W_2(s) = \begin{bmatrix} 5 \frac{\exp(-s)}{(2s^2 + 2s + 1)s} & \frac{\exp(-2s)}{(s^2 + s + 1)s} \\ \frac{\exp(-1,6s)}{(s^2 + 2s + 1)s} & 2 \frac{\exp(-1,2s)}{(2s^2 + 4s + 1)s} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

На рис. 4 показана структурная схема для моделирования этого объекта в программе VisSim, на рис. 5 – результаты оптимизации. Перерегулирование по первому каналу достигло величины 50 %, а по второму каналу – менее 20 %. Длительность переходного процесса составляет по каждому каналу от 20 до 25 с.

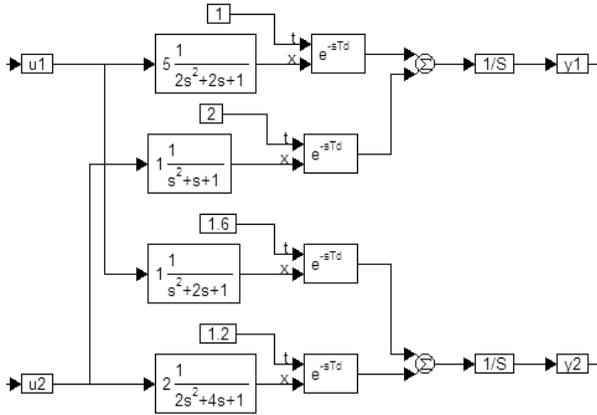


Рис. 4. Структурная схема усложненного объекта

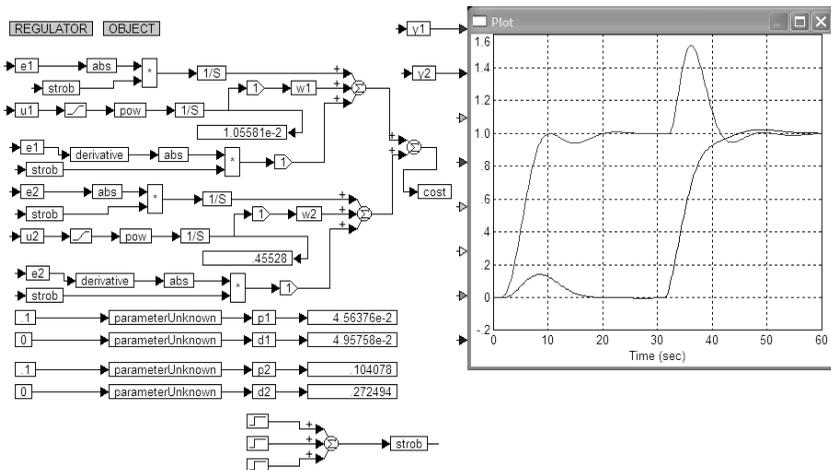


Рис. 5. Структурная схема для оптимизации при моделировании и результат оптимизации регулятора для усложненного объекта

Уравнение полученного регулятора имеет вид

$$W_{R2}(s) = \begin{bmatrix} 0,0456 + 0,0496s & 0 \\ 0 & 0,104 + 0,272s \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Энергетические затраты по каналам управления равны, соответственно, $\theta_1 = 0,0105$; $\theta_2 = 0,455$.

Если из уравнения (10) исключить второе слагаемое, т. е. использовать стоимостную функцию только вида (9), то получим следующий результат: перерегулирование по первому каналу превысит 60 %, перерегулирование по второму каналу не изменится, затраты энергии по каналам достигнут величин: $\theta_1 = 0,01$, $\theta_2 = 0,648$. То есть суммарные затраты энергии возрастут от 0,465 до 0.658, более чем на 40 %.

Уравнение регулятора для этого случая имеет вид

$$W_{R3}(s) = \begin{bmatrix} 0,04217 + 0,0418s & 0 \\ 0 & 0,116 + 0,329s \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Исследования показали, что ввод в стоимостную функцию производной от ошибки несущественно влияет на результат. Это влияние можно повысить за счет большого весового коэффициента, однако, поскольку получаемый результат вполне удовлетворителен, производная ошибки по окончании переходного процесса достаточно мала, указанное моделирование не производилось.

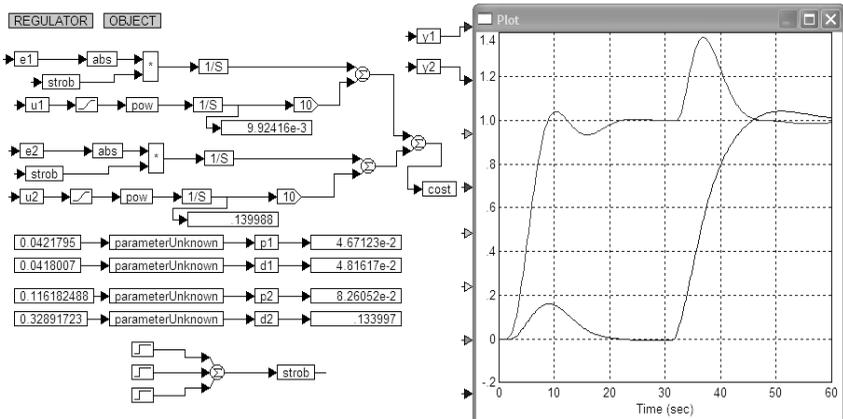


Рис. 6. Результаты оптимизации и энергетических затрат при использовании структуры с весовым коэффициентом $\alpha = 10$

Для дальнейшего уменьшения затрат энергии можно повысить весовой коэффициент при втором члене в соотношении (10). В частности, на рис. 6 показан результат моделирования при $\alpha = 1$. Результирующие затраты энергии по каналам составили при этом $\theta_1 = 0,00992$, $\theta_2 = 0,14$, т. е. общие затраты стали равными 0,15. Это в три раза меньше, чем при $\alpha = 10$, и почти в 4,4 раза меньше, чем при оптимизации без использования второго слагаемого в (10).

Уравнение регулятора для этого случая имеет вид

$$W_{R4}(s) = \begin{bmatrix} 0,0467 + 0,04816s & 0 \\ 0 & 0,0826 + 0,134s \end{bmatrix}. \quad (18)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделированием на двух примерах продемонстрировано, что для объектов, содержащих интегратор, учет в целевой функции энергетических затрат в виде интеграла от суммы квадратов управляющих воздействий позволяет существенно снизить затраты энергии, и при этом обеспечить достижение целей управления, данное утверждение распространяется на задачи управления многосвязными многоканальными объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. PID control-Multi channel [Electronic resource] // National Instruments: website. – Created on: May 21, 2010. – Last modified: May 24, 2010. – URL: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-11463> (accessed: 27.10.2014).
2. Reference example: Multi-channel PID control with operator interface on CompactRIO [Electronic resource] // National Instruments: website. – Created on: Mar. 30, 2009. – Last Modified: Jan. 3, 2013. – URL: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-4134> (accessed: 27.10.2014).
3. A method of multichannel PID control of two-degree-of-freedom wrist joint movements by functional electrical stimulation [Electronic resource] / T. Watanabe, K. Iibuchi, K. Kurosawa and N. Hoshimiya // Systems and Computers in Japan. – 2003. – Vol. 34, iss. 5. – P. 25–36. – Article first published online: 18 Mar. 2003. – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/scj.10298/pdf> (accessed: 27.10.2014).

4. *Chju-Keng Lai, Cin-Ling Chen, Kun-Lin Ho*. A generalized multi-channel PID controller module design using FPGA [Electronic resource]. – doi: 10.1109/3CA.2010.5533634. – URL: http://www.researchgate.net/publication/251936641_A_generalized_multi-channel_PID_controller_module_design_using_FPGA (accessed: 27.10.2014).
5. *Chen Jie*. Multichannel PID temperature controller [Electronic resource] / Changzhou Xionghua Tongtai Automation Equipment Co. Ltd. – URL: <http://www.globalsources.com/si/AS/Changzhou-Xionghua/6008846707555/pdtl/multichannel-PID-temperature-controller/1059121942.htm> (accessed: 27.10.2014).
6. A PID controller module tightly-coupled on a processor datapath [Electronic resource] / T. Gomes, F. Salgado, P. Garcia, J. Mendes, J. Monteiro, A. Tavares. – doi: 10.1109/ISIE.2012.6237287. – URL: http://www.researchgate.net/publication/254045190_A_PID_controller_module_tightly-coupled_on_a_processor_datapath (accessed: 27.10.2014).
7. *Guohan Lin, Guofan Liu*. Tuning PID controller using adaptive genetic algorithms [Electronic resource] / Department of Electrical & Information, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, China // 5th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE), 24–27 Aug. 2010. – doi: 10.1109/ICCSE.2010.5593559. – URL: http://www.researchgate.net/publication/224180129_Tuning_PID_controller_using_adaptive_genetic_algorithms (accessed: 27.10.2014).
8. Real-time implementation of a neural model-based self-tuning PID strategy for oxygen stoichiometry control in PEM fuel cell [Electronic resource] / C. Dammour, M. Benne, C. Lebreton, J. Deseure, B. Grondin-Perez // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, iss. 24. – P. 12819–12825. – doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.039. – URL: http://www.researchgate.net/publication/264241731_Real-time_implementation_of_a_neural_model-based_self-tuning_PID_strategy_for_oxygen_stoichiometry_control_in_PEM_fuel_cell (accessed: 27.10.2014).
9. *Burbano D., di Bernardo M*. Distributed PID control for consensus of homogeneous and heterogeneous networks [Electronic resource]. – Submitted on 8 Sept. 2014 (v1), last revised 21 Oct. 2014 (this version, v2). – URL: http://www.researchgate.net/publication/265469294_Distributed_PID_Control_for_Consensus_of_Homogeneous_and_Heterogeneous_Networks (accessed: 27.10.2014).
10. *Leith Z., Bechhoefer J*. Split PID control: two sensors can be better than one [Electronic resource] // Review of Scientific Instrument. – Submitted on 5 Okt. 2014. – Vol. 85, iss. 10. – URL: http://www.researchgate.net/publication/266560749_Split_PID_control_two_sensors_can_be_better_than_one (accessed: 27.10.2014).

11. Multi-channels module type PID controller (MMC) [Electronic resource] // VERTEX Technology Corp: website. – URL: <http://vertex-tw.com/english/mmc.htm> (accessed: 27.10.2014).
12. CMC-99/141 Multichannel PID controller [Electronic resource] // Impress: Sensors and Systems: website. – URL: <http://www.impress-sensors.co.uk/products/sensor-products/process-controllers/multichannel-pid-controllers/cmc-99-multichannel-indicator-with-bargraph-display.html> (accessed: 27.10.2014).
13. Zhmud V.A. The use of the feedback control systems in laser physics researching experiments // Proceedings of RFBR and DST sponsored “The 2nd Russian-Indian joint workshop on computational intelligence and modern heuristics in automation and robotics”, 10–13 September, 2011. – Novosibirsk, [2012]. – Additional vol. – P. 40–43.
14. The modeling tests of the new PID-regulators structures / A.A. Voevoda, V.A. Zhmud, R.Y. Ishimtsev, V.M. Semibalamut // Proceedings of the 18th IASTED international conference on applied simulation and modelling, ASM 2009, Sept. 7–9, 2009, Palma de Mallorca, Spain. – [S. 1.], 2009. – P. 165–168.
15. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators / V. Zhmud, O. Yadrishnikov, A. Poloshchuk, A. Zavorin // Proceedings – 2012 7th international forum on strategic technology (IFOST 2012), Tomsk, September 18–21. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2. – P. 1367–1370. – doi: 10.1109/IFOST.2012.6357804
16. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6 / V. Zhmud, A. Liapidevskiy, E. Prokhorenko // Proceedings of the 30 th IASTED international conference on modelling, identification and control, AsiaMIC 2010, November 24–26, 2010. – Phuket, Thailand, 2010. – P. 27–32. – doi: 10.2316/P.2010.702-018
17. Zhmud V., Yadrishnikov O. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function // Proceedings of the 8th International forum on strategic technology – 2013 (IFOST-2013), 28 June–1 July, Mongolian university of science and technology, Ulaanbaatar, Mongolia. IEEE organized. – 2013. – Vol. 2. – P. 265–270.
18. The tuning of the PID-regulator for automatic control system of thermo energetic equipment / V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R.V. Rao // Proceedings of the Fifth international conference on advances in mechanical engineering (ICAME–2011), June 06–08, 2011. – Surat, Gujarat, India, 2011. – P. 254–263.
19. Жмудь В.А., Заворин А.Н. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVI между-

народной конференции, 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара, Россия. – С. 557–567.

20. *Zhmud V.A., Zavorin A.N.* Metodi di Ottimizzazione del Controllo Numerico su una Modelli Troncati [Electronic resource] // Italian Science Review. – 2014. – Iss. 4 (13). – P. 686–689. – URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> (accessed: 27.10.2014).

21. *Дьяконов В.П.* VisSim + Mathcad + MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

22. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с. – (Серия: Полное руководство пользователя).

Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой автоматики Новосибирского государственного технического университета, профессор, доктор технических наук. Имеет более 250 публикаций, включая 16 патентов, 12 учебных пособий. Основные направления исследований: теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника. E-mail: oao_nips@bk.ru

Владим Михайлович Семибаламут – начальник Сибирской опытно-методологической лазерной экспедиции Геофизической службы СО РАН, кандидат физико-математических наук. Имеет более 150 публикаций. Основные направления исследований: информатика, системы сбора данных, геофизические данные, предвестники землетрясений, системы связи. E-mail: wladim28@yandex.ru

Design of power saving pd-regulators for multi-channel objects by numerical optimization with simulation*

V.A. Zhmud¹, V.M. Semibalamut²

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, doctor of Technical Sciences, professor. E-mail: oao_nips@bk.ru*

² *Geophysical Survey SB RAS, 13/3 Akademik Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, candidate Physics and mathematics Sciences. E-mail: wladim28@yandex.ru*

Design of multi-channel regulators by analytical methods is difficult. This is due to the fact that if the object is described by a complex mathematical model, then analytical

* Received 5 June 2014.

methods require complicated computations, which can not be set by the relations in general. Therefore, the more complex is the model of the object, the more difficult is the use of analytical methods. In multiply (or multi-channel) objects, this problem is most acute, since such objects for each input signal affects every output value. Links between inputs and outputs are described by the according transfer functions. If these transfer functions are simple, such as first-order filters, the analytical methods can be applied. If in such transfer functions contains links delay, or of for the adequately description of such relations the use of non-linear element is necessary, then the analytical calculation of the regulator is impossible. Numerical optimizations methods in simulation allow simplify this task. However, it can give the system with too bug overshooting. The paper proposes the use regular methodic which has been proved with simulation. Often in the matrix of the regulator requires not only the content of non-zero elements in its main diagonal, but also the presence of non-zero elements in other positions of the matrix. However, if the diagonal matrix provides a fairly efficient management, the introduction of other elements may not be required. One of the tricks to increase the efficiency of calculating the regulator is the right choice numeration of the inputs and outputs of the channels. This involves selection of the correspondence between the input and moves you, so that in the main diagonal as possible elements with large coefficients take place in comparison with other elements and (or) elements with high-speed (i.e., with lower values of the time constants in the denominator). Therefore, in the examples objects that meet this requirement are used. If it is not satisfied, should be remuneration of outputs or inputs is necessary.

Keywords: automation, control, multi-channel systems, optimization, simulation, energy saving, automatic control theory, numerical optimization

REFERENCES

1. PID control-Multi channel. National Instruments. Created on: May 21, 2010, 5:06 PM by Pcorcs – Last Modified: May 24, 2010, 11:24 AM by Pcorcs. Available at: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-11463> (accessed 27.10.2014)
2. Reference Example: Multi-channel PID Control with operator interface on CompactRIO. National Instruments. Created on: Mar. 30, 2009, 2:48 PM by jkurtw – Last Modified: Jan. 3, 2013, 9:53 AM by Timothy A. Available at: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-4134> (accessed 27.10.2014)
3. Takashi Watanabe, Kan Iibuchi, Kenji Kurosawa and Nozomu Hoshimiya. A method of multichannel PID control of two-degree-of-freedom wrist joint movements by functional electrical stimulation. Article first published online: 18 Mar. 2003. *Systems and Computers in Japan*, 2003, vol. 34, iss. 5, pp. 25–36. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/scj.10298/pdf> (accessed 27.10.2014)
4. Chju-Keng Lai, Cin-Ling Chen, Kun-Lin Ho. A generalized multi-channel PID controller module design using FPGA. doi: 10.1109/3CA.2010.5533634.

Available at: http://www.researchgate.net/publication/251936641_A_generalized_multi-channel_PID_controller_module_design_using_FPGA (accessed 27.10.2014)

5. Chen Jie. Multichannel PID temperature controller. Changzhou Xionghua Tongtai Automation Equipment Co. Ltd. Available at: <http://www.global-sources.com/si/AS/Changzhou-Xionghua/6008846707555/pdt/multichannel-PID-temperature-controller/1059121942.htm> (accessed 27.10.2014)

6. Gomes T., Salgado F., Garcia P., Mendes J., Monteiro J., Tavares A. A PID controller module tightly-coupled on a processor datapath. doi: 10.1109/ISIE.2012.6237287. Available at: http://www.researchgate.net/publication/254045190_A_PID_controller_module_tightly-coupled_on_a_processor_datapath (accessed 27.10.2014)

7. Guohan Lin, Guofan Liu. Tuning PID controller using adaptive genetic algorithms. 5th International conference on computer science and education (ICCSE), 24–27 Aug. 2010. doi: 10.1109/ICCSE.2010.5593559. Available at: http://www.researchgate.net/publication/224180129_Tuning_PID_controller_using_adaptive_genetic_algorithms (accessed 27.10.2014)

8. Damour C., Benne M., Lebreton C., Deseure J., Grondin-Perez B. Real-time implementation of a neural model-based self-tuning PID strategy for oxygen stoichiometry control in PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, iss. 24, pp. 12819–12825. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.039. Available at: http://www.researchgate.net/publication/264241731_Real-time_implementation_of_a_neural_model-based_self-tuning_PID_strategy_for_oxygen_stoichiometry_control_in_PEM_fuel_cell (accessed 27.10.2014)

9. Burbano D., di Bernardo M. Distributed PID control for consensus of homogeneous and heterogeneous networks. Submitted on 8 Sept. 2014 (v1), last revised 21 Oct. 2014 (this version, v2). Available at: http://www.researchgate.net/publication/265469294_Distributed_PID_Control_for_Consensus_of_Homogeneous_and_Heterogeneous_Networks (accessed 27.10.2014)

10. Znaimer L., Bechhoefer J. Split PID control: two sensors can be better than one. Submitted on 5 Oct. 2014. Available at: http://www.researchgate.net/publication/266560749_Split_PID_control_two_sensors_can_be_better_than_one (accessed 27.10.2014)

11. Multi-channels module type PID controller (MMC). VERTEX Technology corp. Available at: <http://vertex-tw.com/english/mmc.htm> (accessed 27.10.2014)

12. CMC-99/141 Multichannel PID controller. Impress: Sensors and Systems. Available at: <http://www.impress-sensors.co.uk/products/sensor-products/process-controllers/multichannel-pid-controllers/cmc-99-multichannel-indicator-with-bargraph-display.html> (accessed 27.10.2014)

13. Zhmud V.A. The use of the feedback control systems in laser physics researching experiments. Proceedings of RFBR and DST sponsored "The 2-nd Russian-Indian joint workshop on computational intelligence and modern heuristics in automation and robotics", Novosibirsk, 10–13 September, 2011, Additional vol., pp. 40–43.

14. Voevoda A.A., Zhmud V.A., Ishimtsev R.Y., Semibalamut V.M. The modeling tests of the new PID-regulators structures. Proceedings of the IASTED international conference on applied simulation and modelling, ASM 2009, pp. 165–168.

15. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Proceedings – 2012 7th international forum on strategic technology (IFOST 2012), September 18–21, Tomsk, TPU Press, 2012, vol. 2, pp. 1367–1370. doi: 10.1109/IFOST.2012.6357804

16. Zhmud V., Liapidevskiy A., Prokhorenko E. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. 2010. Proceedings of the 30 th IASTED international conference on modelling, identification and control, AsiaMIC 2010, November 24–26, 2010, Phuket, Thailand, 2010, pp. 27–32. doi: 10.2316/P.2010.702-018

17. Zhmud V., Yadrishnikov O. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8th international forum on strategic technology 2013 (IFOST–2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian university of science and technology, Ulaanbaatar, Mongolia. IEEE organized, 2013, pp. 265–270. Available at: <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/> (accessed 27.10.2014)

18. Zhmud V., Polishchuk A., Voevoda A., Rao R.V. The Tuning of the PID-regulator for automatic control system of thermo energetic equipment. Proceedings of the Fifth international conference on advances in mechanical engineering (ICAME–2011), June 06–08, 2011, Surat, Gujarat, India, pp. 254–263.

19. Zhmud' V.A., Zavorin A.N. [The method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"* [Proceedings of the XVI international conference "Problems of control and modeling in complex systems"], Samara, 2014, pp. 557–567. (In Russian)

20. Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. *Italian Science Review*, 2014, iss. 4 (13), pp. 686–689. Available at: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> (accessed: 27.10.2014)

21. D'yakonov V.P. *VisSim + Mathcad + MATLAB. Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie* [VisSim + Mathcad + MATLAB. The visual matematicheskoe modelirovanie]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2004. 384 p.

22. D'yakonov V.P. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 v matematike i modelirovanii. Seriya: Polnoe rukovodstvo pol'zovatelya* [MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 in mathematics and modeling. Series: Full user manual]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2003. 576 p.